

# АНТЕННЫ, ВОЛНОВОДНАЯ И КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.04.310>

УДК 621.382

PACS number: 41.20.-q

А. Е. КОГУТ<sup>1</sup>, И. К. КУЗЬМИЧЕВ<sup>1</sup>, Е. А. КОГУТ<sup>2</sup>, Р. С. ДОЛЯ<sup>1</sup>,  
С. О. НОСАТЮК<sup>1</sup>, Е. А. ШУЛЬГА<sup>1</sup>, ХЕ ДЖАОЧАН<sup>3</sup><sup>1</sup> Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина  
E-mail: kogut@ire.kharkov.ua, roma\_vb@mail.ru, nosatyk\_sergey@mail.ru,  
Shulgaevgeniy.ne@mail.ru<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина<sup>3</sup> Восточно-Китайский НИИ “Фотоэлектроника”,  
г. Уху, 241002, провинция Аньхой, Китай

## ВЫСОКОДОБОТНЫЙ ДИСКОВЫЙ ЭКРАНИРОВАННЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

Предмет и цель работы: *Исследование экранированного дискового диэлектрического резонатора (ДР), обладающего высокой добротностью и улучшенными спектральными характеристиками.*

Методы и методология: *Экспериментальные исследования энергетических характеристик рассматриваемого экранированного резонатора проведены с помощью измерительного комплекса PNA-L Network Analyzer N5230a 10 MHz ÷ 40 GHz Agilent Technologies. Спектральные характеристики резонансной системы анализировались на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны по напряжению P2-65. Моды, возбуждаемые в экранированном ДР, идентифицировались путем изучения распределения электрической компоненты резонансного поля вдоль радиальной координаты. Для быстрого и точного численного моделирования рассматриваемой резонансной системы использовался пакет программ CST Microwave Studio 2013.*

Результаты: *Рассмотрены особенности возбуждения низшей радиальной  $HE_{3111}$  моды шепчущей галереи в экранированном дисковом ДР с помощью волноводного элемента связи. Показано, что в области границы раздела сред диэлектрик–воздух резонансное поле характеризуется наибольшей интенсивностью. Максимальная эффективность возбуждения мод шепчущей галереи в ДР достигается при расположении элемента связи на краю диэлектрического диска. Установлено, что поле моды шепчущей галереи в открытом дисковом ДР сосредоточено в основном в материале, из которого изготовлен резонатор. В экранированном ДР резонансное поле смещается в область воздушного зазора. При этом омические потери в стенках экрана невелики, поскольку интенсивность резонансного поля на границе раздела сред воздух–металл незначительна. Благодаря этому нагруженная добротность экранированного резонатора более чем в 1.9 раза выше нагруженной добротности открытого ДР.*

Заключение: *Экранированный дисковый ДР при определенных условиях возбуждения обладает высоким значением нагруженной добротности и разреженным спектром колебаний. Это делает его перспективным для использования в схемах стабилизации частоты твердотельных источников миллиметрового диапазона.*

Ключевые слова: *экранированный диэлектрический резонатор, моды шепчущей галереи, нагруженная добротность, разреженный спектр*

### 1. Введение

Интерес к задачам электродинамики миллиметрового диапазона связан с необходимостью создания приборов и устройств с улучшенными выходными характеристиками либо с новыми функцио-

нальными возможностями. Особое место в их ряду занимают задачи селекции спектра колебаний. Это особенно важно при стабилизации частоты источников внешним резонатором. В миллиметровом диапазоне для этих целей целесообразно применять диэлектрические резонаторы (ДР) с цилиндрическим и сферическим типом криволинейной поверхности. В таких резонаторах возбуждаются

© А. Е. Когут, И. К. Кузьмичев, Е. А. Когут, Р. С. Доля,  
С. О. Носатюк, Е. А. Шульга, Хе Джаочан, 2017

слабозатухающие моды шепчущей галереи (ШГ) [1, 2]. При этом особое внимание уделяется электродинамическим характеристикам используемых резонансных систем, среди которых по своей значимости выделяются добротность и одночастотный отклик в полосе частот. ДР обладают относительно разреженным спектром и высокой добротностью мод ШГ, значение которой в основном определяется потерями в материале диэлектрика и малыми радиационными потерями. Однако, наряду с очевидными достоинствами, открытые ДР обладают существенным недостатком, затрудняющим их практическое применение. Это низкая помехозащищенность от совмещенных с ними излучающих модулей.

Решить данную проблему позволяет экранирование диэлектрических резонансных структур. Как показали результаты ранее проведенных исследований, экранирование ДР проводящими поверхностями приводит к снижению добротности по причине омических потерь в стенках металлического экрана и к сгущению спектра колебаний. Последнее связано с возбуждением в экранированных ДР, наряду с модами самого ДР, колебаний металлического экрана, который в большинстве случаев обладает собственными резонансными свойствами [3, 4].

Обеспечить высокую добротность позволяет применение ДР со сферическим типом криволинейной поверхности с воздушным зазором между резонатором и экраном. Такая система при определенных соотношениях размеров диэлектрического элемента и металлического экрана позволяет получать значения собственной добротности, превосходящие пороговое значение, обусловленное потерями в материале диэлектрика и металле [5]. Причиной этого является частичное смещение резонансного поля мод ШГ из диэлектрического элемента резонатора в воздушный зазор таким образом, что омические потери в стенках металлического экрана незначительны. Добротность экранированных таким образом ДР становится выше добротности подобных открытых резонаторов. Однако проблемным вопросом остается модовый состав спектра колебаний экранированных резонаторов со сферическим типом криволинейной поверхности. Наиболее часто рабочие моды ШГ в таких резонаторах возбуждаются локальными элементами в виде открытого конца прямоугольного волновода. При этом

поля колебаний на поверхности диэлектрического шара (полусфера) разделяются на семейства волнующих каналов, имеющих вид поясков [6]. Каждый из них соответствует возбуждению моды с собственной резонансной частотой. Различие в резонансных частотах соседних мод может варьироваться от единиц до десятков мегагерц. На практике это приводит к сгущению спектра собственных частот такой резонансной системы и, как следствие, к неоднозначному отклику резонансной системы при изменении частоты задающего генератора. Поэтому использование экранированных ДР со сферическим типом криволинейной поверхности для стабилизации частоты затруднено.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование экранированных ДР с цилиндрическим типом криволинейной поверхности, которые обладают высокой добротностью и улучшенными спектральными характеристиками.

## 2. Объект и методика исследований

В соответствии с поставленной целью и результатами ранее проведенных исследований предлагается использовать экранированный ДР на основе диэлектрического диска. По сравнению с открытыми диэлектрическими резонансными структурами других геометрических форм такие ДР имеют наиболее разреженный спектр колебаний [2]. Возбуждаемые в них гибридные  $EH_{nml}$  или  $HE_{nml}$  моды ШГ при соответствующих размерах диэлектрического диска отличаются только значением азимутального индекса  $n$ . При этом значения радиального и аксиального индексов мод ШГ одинаковы ( $m = 1$  и  $l = 1$ ). Расстояние по шкале частот между соседними резонансами может составлять от сотен мегагерц до единиц гигагерц. Необходимо отметить, что комплексные исследования экранированных ДР на основе дисковых резонансных структур ранее проведены не были.

На рис. 1 показан объект экспериментальных исследований, представляющий собой диэлектрический диск 1, который расположен в полусферическом металлическом экране 2 таким образом, что одно из оснований диска находится в плоскости сечения металлической сферы, разделяющей ее на две равные части.

Диск изготовлен из фторопласта-4 с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2.08$  и тангенсом

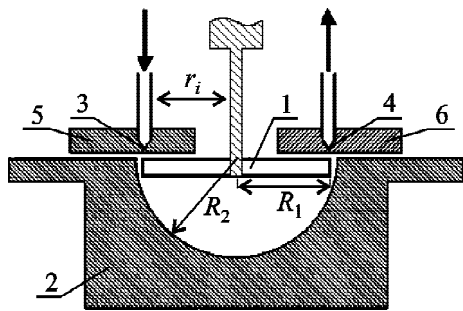


Рис. 1. Объект экспериментальных исследований

угла потерь в диэлектрике  $\operatorname{tg}\delta = 1.7 \cdot 10^{-4}$ . Толщина  $H$  и радиус  $R_1$  диэлектрического диска равны 7.2 и 39 мм соответственно. Экран из алюминия имеет радиус полусферической полости  $R_2 = 42$  мм. Следует ожидать, что различие в классах симметрии диэлектрического диска и металлического экрана не окажет существенного влияния на основные электродинамические характеристики резонатора в целом. В то же время спектр колебаний такой резонансной системы должен быть более разреженным. Ранее проведенные исследования экранированных полусферических ДР с экранами, имеющими сферическую форму поверхности, определили выбор радиусов диэлектрического элемента резонатора 1, рассматриваемого в настоящей работе, и его экрана 2 [3].

Возбуждение мод ШГ в экранированном ДР реализовывалось с помощью метода, предложенного в работе [7]. Для этого использовался полый металлический прямоугольный волновод 3 с поперечными размерами  $7.2 \times 3.4$  мм, суженный вдоль узкой стенки до сечения  $7.2 \times 0.5$  мм. Согласно рис. 1 возбуждение мод ШГ в экранированном ДР осуществлялось со стороны плоского основания диэлектрического диска. При этом для повышения эффективности возбуждения, как показано в работе [7], продольная ось подводщего волновода располагалась перпендикулярно плоскому основанию диска. Ось симметрии диска лежала в плоскости, проходящей через середины узких стенок волноводов. Расстояние от оси вращения диска до центров излучающего и приемного волноводов составляло  $a \approx R_1$ , т. е. центры обоих волноводов располагались над краем основания диэлектрического диска. При таких условиях в резонаторе приоритетно возбуждаются гибридные моды  $HE$ -поляризации. Рассматри-

ваемый в работе способ возбуждения мод ШГ в дисковых ДР отличается от ранее известных [2].

Во-первых, резонатор включался по схеме “на проход”. Для этого одинаковые по геометрическим размерам элементы возбуждения 3 и вывода энергии 4 сечением  $7.2 \times 0.5$  мм располагались в плоских металлических зеркалах 5 и 6 прямоугольной формы (см. рис. 1). Такая схема возбуждения многомодового экранированного резонатора позволяла осуществлять селекцию мод ШГ за счет изменения положения волновода относительно края диэлектрического диска [8]. Использование в эксперименте плоских зеркал давало возможность с высокой точностью ориентировать оси волноводов перпендикулярно плоскому основанию диэлектрического диска. Размеры плоских зеркал составляли  $55 \times 50$  мм. Их положение выбиралось таким образом, чтобы уменьшить радиационные потери рабочей моды ШГ дискового резонатора. Моды других типов, поля которых локализованы ближе к оси резонатора, не возбуждались, поскольку эффективность их возбуждения была мала по причине высоких радиационных потерь. Речь идет о так называемых “лучевых колебаниях” [9].

Во-вторых, элементы возбуждения и вывода энергии были подвижны вдоль радиуса плоского основания диска. Это позволило, с одной стороны, регулировать величину связи, а с другой стороны, появилась возможность исследовать ее влияние на спектральные и энергетические характеристики резонатора. Ранее было показано, что величина связи может оказывать существенное влияние на электродинамические характеристики резонатора в режиме возбуждения мод ШГ [7].

Исследования проводились в полосе частот  $27.5 \div 37.5$  ГГц. Измерялись резонансные частоты возбуждаемых  $HE_{nml}$  мод и ослабление сигнала на выходе резонатора. По измеренным данным определялись значения нагруженной добротности по уровню  $-3$  дБ относительно центральной частоты резонанса и коэффициента передачи в относительных единицах. Для его определения отношение измеренной амплитуды  $A_0$  выходного сигнала в децибелах на резонансной частоте нормировалось на максимальную амплитуду  $A_{\max}$ , полученную при перемещении возбуждающего элемента связи вдоль радиальной координаты  $r_i$ . В работе данная зависимость представлена в от-

носительных единицах в виде  $A_0/A_{\max} = \psi(r_i/R_2)$ . Положение середины поперечного сечения элемента вывода энергии фиксировалось на краю плоского основания диска в точке с относительной радиальной координатой  $r_0/R_2 \approx 0.93$ . Экспериментальные исследования энергетических характеристик двухслойного экранированного резонатора были проведены с помощью измерительного комплекса PNA-L Network Analyzer N5230a 10 MHz ÷ 40 GHz Agilent Technologies. Спектральные характеристики рассматриваемой резонансной системы анализировались на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны по напряжению P2-65. Моды, возбуждаемые в экранированном ДР, идентифицировались путем изучения распределения электрической компоненты резонансного поля вдоль радиальной координаты. Для этого были проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование, выполненное на основе стандартного программного обеспечения CST Microwave Studio 2013. Пакет программ был предоставлен Восточно-Китайским НИИ «Фотоэлектроника» в ходе совместных исследований. В эксперименте представление о радиальном распределении резонансного поля возбуждаемых мод позволило получить зависимость относительной амплитуды  $A_0/A_{\max}$  выходного сигнала на резонансной частоте от относительной радиальной координаты  $r_0/R_2$  середины открытого конца волновода вывода энергии при фиксированной радиальной координате элемента возбуждения  $r_i/R_2 \approx 0.93$  (на краю диэлектрического диска).

### 3. Экспериментальные результаты и их объяснение

Свидетельством разреженности спектра колебаний исследуемого экранированного резонатора по сравнению со спектром резонатора на основе диэлектрического полушара являются спектрограммы, представленные на рис 2. Диск и полушар имели одинаковый диаметр основания и были выполнены из одного материала. Видно, что спектр экранированного резонатора на основе диэлектрического диска более разрежен. Это говорит о правомерности сделанного выше предположения, что дисковый ДР в полусферическом металлическом экране должен иметь более разреженный спектр колебаний. Как упоминалось выше,

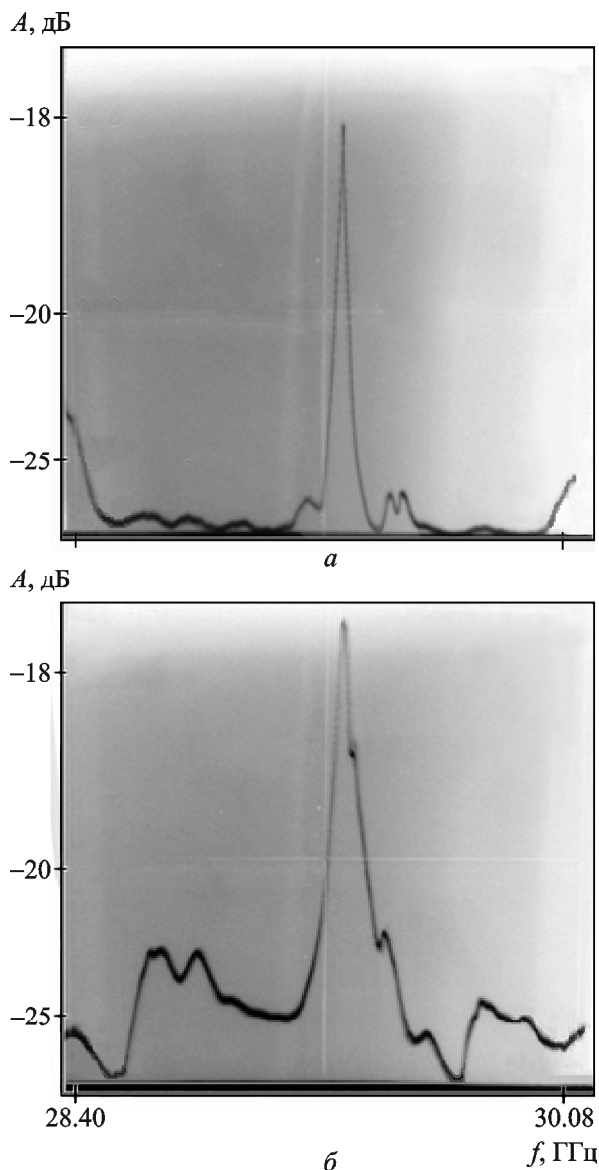


Рис. 2. Участки спектров колебаний двухслойных экранированных ДР на основе диэлектрических диска (а) и полушара (б)

в спектре полушарового ДР присутствуют моды, поля которых пространственно разделены на сферической поверхности диэлектрической резонансной структуры и имеют форму неоднородных по ширине поясков. Общим для спектров обоих резонаторов является присутствие мод самого экрана, который, как упоминалось выше, обладает собственными резонансными свойствами.

На рис. 3 представлено распределение поля нижней радиальной  $HE_{3111}$ -моды ШГ, полученное путем компьютерного моделирования (двухмерное (а) и трехмерное (б) изображение).

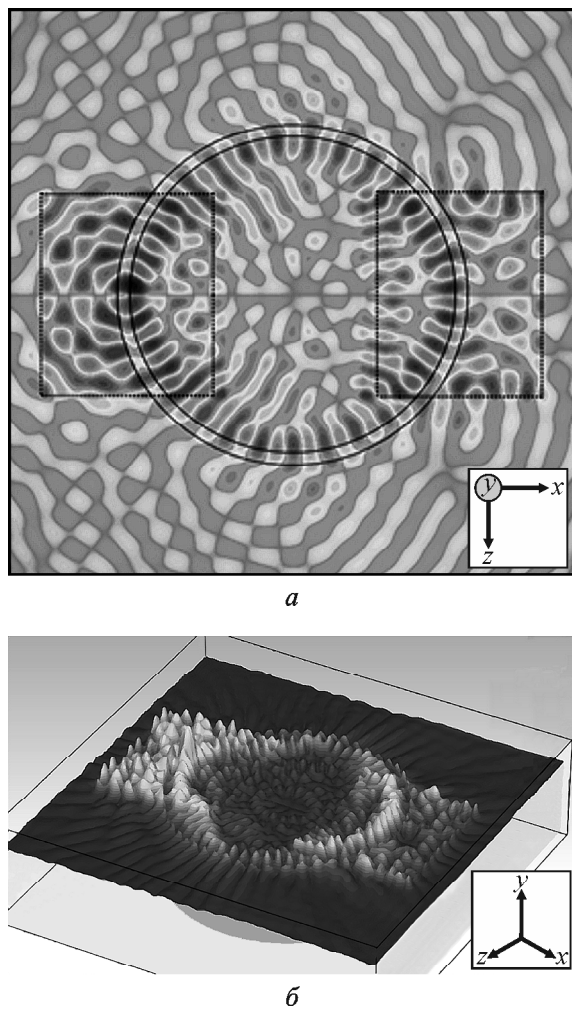


Рис. 3. Распределение поля  $HE_{3111}$ -моды ШГ в экранированном дисковом ДР

Обращает на себя внимание область расположения ограниченных металлических зеркал. Видно, что их края возмущают резонансное поле. Это проявляется в искажении формы пятен полей. Кроме того, поле резонатора проникает в область между плоским основанием металлического экрана и металлическими зеркалами, образуя в этом зазоре интерференционную картину. Ранее подобный эффект наблюдался при возбуждении полусферовых и полудисковых экранированных ДР планарными волноводами [8, 10].

В работах [7, 11] было показано, что спектральные и энергетические характеристики открытых ДР зависят от условий и способов возбуждения в них рабочих мод колебаний. Причиной этого является возмущение резонансного поля локальным элементом возбуждения. В связи с этим

представляет практический интерес рассмотреть влияние возбуждающего элемента связи на основные характеристики экранированного дискового ДР. В открытых дисковых ДР, возбуждаемых на модах ШГ открытым концом металлического волновода, изменение условий возбуждения достигалось путем перемещения открытого конца волновода вдоль аксиальной координаты. В нашем случае, как показано выше, волноводный элемент связи перемещается вдоль радиуса диска.

На рис. 4, 5 и 6 представлены зависимости изменения резонансной частоты  $\Delta f_{n1}$  для  $HE_{3111}$ -моды ШГ, нормированного коэффициента передачи  $A_0/A_{\max}$  и нагруженной добротности  $Q_L$  от относительной радиальной координаты  $r_i/R_2$  элемента возбуждения.

Как отмечалось выше, положение середины поперечного сечения элемента вывода сигнала фиксировалось на краю плоского основания диэлектрического диска ( $r_0/R_2 \approx 0.93$ ). Значению величины  $\Delta f_{n1} = 0$  соответствует положение элемента возбуждения на краю диска.

Видно, что резонансная частота зависит от положения элемента возбуждения вдоль радиальной координаты. Ее значение может изменяться на 20 МГц. При этом наибольшее влияние на изменение резонансной частоты элемент возбуждения оказывает на краю диэлектрического диска. Из этого можно сделать вывод, что именно в области границы раздела сред диэлектрик–воздух резонансное поле характеризуется наибольшей интенсивностью.

С точки зрения физических процессов значение коэффициента передачи информативно для оценки эффективности возбуждения рабочих мод

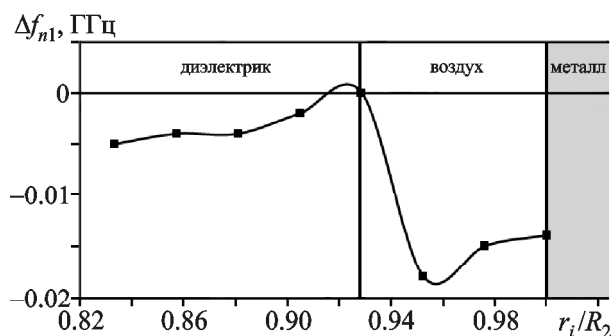


Рис. 4. Зависимость изменения резонансной частоты  $HE_{3111}$ -моды ШГ от радиальной координаты элемента возбуждения

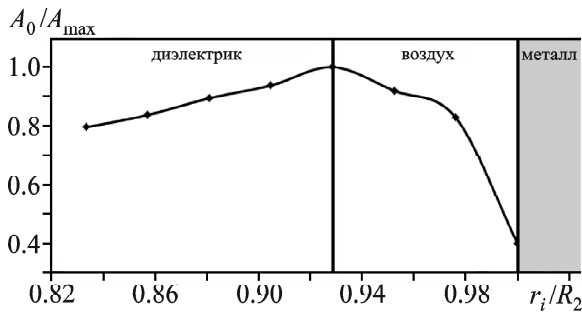


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента передачи от радиальной координаты элемента возбуждения

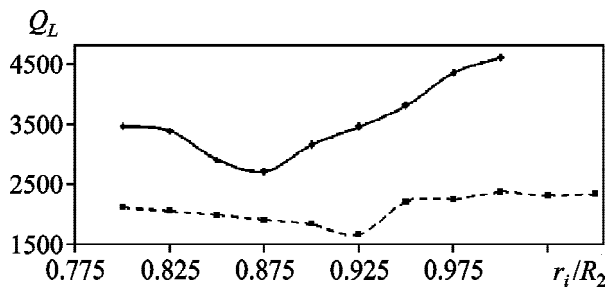


Рис. 6. Зависимость нагруженной добротности экранированного (сплошная линия) и открытого (пунктирная линия) дисковых ДР от радиальной координаты элемента возбуждения

колебаний в резонаторе. Из рис. 5 видно, что наибольшая эффективность возбуждения мод ШГ в ДР достигается при расположении середины открытого конца волновода на краю диэлектрического диска, что хорошо согласуется с данными о возбуждении мод ШГ в открытых дисковых ДР [7]. Резкое уменьшение амплитуды прошедшего сигнала по мере удаления возбуждающего элемента связи от края диэлектрического диска ( $r_i/R_2 \approx 0.93$ ) связано с уменьшением эффективности возбуждения мод ШГ в резонаторе.

Для оценки поведения энергетических характеристик при изменении условий возбуждения рабочих мод ШГ в экранированном резонаторе наиболее информативной является зависимость его добротности от радиальной координаты элемента возбуждения. На рис. 6 значения нагруженной добротности  $Q_L$  исследуемого дискового экранированного ДР представлены сплошной линией. Для сравнения здесь же показано поведение нагруженной добротности для открытого дискового ДР таких же геометрических размеров (пунктирная линия).

Из рисунка видно, что добротность экранированного дискового ДР превосходит добротность подобного открытого резонатора. При этом ее значение зависит от места расположения элемента возбуждения относительно края диска. Необходимо отметить, что при расположении щели связи в области диска значения коэффициентов передачи экранированного и открытого ДР были близки. Наибольшего значения  $Q_L = 4530$  нагруженная добротность достигает при расположении открытого конца волновода вблизи металлического экрана. Его середина при этом находится в воздушном зазоре между резонатором и экраном. Минимум добротности  $Q_L = 2520$  наблюдается при расположении элемента возбуждения в области диэлектрического диска недалеко от его края ( $r_i/R_2 \approx 0.88$ ). Именно эта область характеризуется наибольшими значениями интенсивности резонансного поля моды ШГ. Поэтому потери за счет дифракции резонансного поля на элементе связи в этом случае будут максимальными. Это скажется на значении нагруженной добротности резонатора, что хорошо видно на рис. 6. Для объяснения роста добротности при смещении открытого конца волновода в воздушный зазор резонатора были проведены исследования распределения интенсивности резонансного поля рабочей моды  $HE_{3111}$  вдоль радиальной координаты (сплошная кривая на рис. 7). Видно, что в непосредственной близости к стенкам экрана относительная интенсивность поля резко понижается до минимальных значений  $A_0/A_{max} \approx 0.14$ . Это говорит о том, что уменьшается величина связи резонатора с волноводом. В этом случае увеличивается добротность связи и, как следствие, нагруженная добротность, которая в пре-

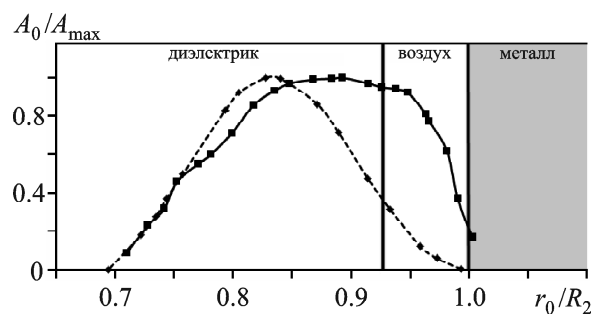


Рис. 7. Распределение относительной интенсивности резонансного поля мод ШГ в экранированном (сплошная линия) и открытом (пунктирная линия) дисковых ДР

деле должна стремиться к собственной добротности резонатора.

Результаты исследования радиального распределения интенсивности резонансного поля моды ШГ объясняют и более высокие значения добротности дискового экранированного ДР по сравнению с добротностью подобного открытого резонатора. Распределение поля моды ШГ в открытом дисковом ДР представлено на рис. 7 в виде пунктирной кривой.

Видно, что в отличие от экранированного резонатора в открытом дисковом ДР поле моды ШГ в основном сосредоточено в диэлектрическом материале. Существенное влияние на значение добротности в этом случае оказывают потери в диэлектрике. В экранированном ДР резонансное поле смещается в область воздушного зазора. При этом потери в материале диэлектрика снижаются. В то же время омические потери в стенках экрана невелики, поскольку, как отмечалось выше, интенсивность резонансного поля на границе раздела сред воздух–металл незначительна. Подобный рост добротности в двухслойных экранированных ДР был установлен для полусферических диэлектрических экранированных структур [5]. Можно предположить, что этот эффект является вторым фактором, приводящим к более высокому значению  $Q_L$  экранированного дискового резонатора, чем  $Q_L$  открытого (см. рис. 6).

#### 4. Выводы

Изучены электродинамические характеристики экранированного ДР на основе диэлектрического диска в режиме возбуждения мод ШГ. Установлено, что при определенных условиях возбуждения добротность такого резонатора существенно превышает добротность подобного открытого ДР. Показано, что исследуемый резонатор обладает разреженным спектром колебаний. Это делает его перспективным для использования в ряде пассивных и активных устройств миллиметрового диапазона длин волн. Наиболее интересным применением высокодобротных экранированных ДР с модами ШГ являются схемы стабилизации частоты твердотельных источников электромагнитного излучения миллиметрового диапазона.

Авторы статьи выражают благодарность С. И. Тарапову и С. В. Недуху за техническую поддержку при организации эксперимента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильченко М. Е., Взятыйшев В. Ф., Гассанов Л. Г., Безбородов Ю. М. Диэлектрические резонаторы / Под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. Кириченко А. Я., Прокопенко Ю. В., Филиппов Ю. Ф., Черпак Н. Т. Квазиоптические твердотельные резонаторы. – Киев: Наукова думка, 2008. – 296 с.
3. Бажилев В. А. Расчет и исследование цилиндрических экранированных СВЧ и КВЧ колебательных систем на основе диэлектрических резонаторов: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.12.07 – Нижний Новгород: НИИ измерительных систем им. Ю. Е. Седакова, 2007. – 20 с.
4. Козут А. Е., Кутузов В. В., Харьковский С. Н. Вынужденные колебания высшего порядка полусферического экрана // 8-я Международная Крымская конф. “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”: Труды конф. – Севастополь, Украина. –1998. – Т. 1. – С. 158–159.
5. Eremenko Z. E., Filipov Y. F., Kharkovsky S. N., and Kozut A. E. Whispering-gallery modes in shielded hemispherical dielectric resonators // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2002. – Vol. 50, Is. 11. – P. 2647–2649. DOI: 10.1109/TMTT.2002.804627
6. Харьковский С. Н., Козут А. Е., Солодовник В. А. Фокусировка волн типа шепчущей галереи в квазиоптическом полусферическом диэлектрическом резонаторе // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, Вып. 18. – С. 38–42.
7. Иванов Е. Н., Карачев А. А., Царапкин Д. П. Повышение эффективности возбуждения дисковых диэлектрических резонаторов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, № 10. – С. 68–69.
8. Носатюк С. О. Возбуждение мод шепчущей галереи в экранированных квазиоптических диэлектрических резонаторах планарным волноводом : Автореф. дисс... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 – Харьков: ИРЭ НАНУ, 2016. – 20 с.
9. Харьковский С. Н., Козут А. Е., Кутузов В. В. Возбуждение лучевых колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах с модами шепчущей галереи // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, Вып. 15. – С. 25–29.
10. Козут А. Е., Носатюк С. О., Солодовник В. А., Доля Р. С. Реализация режима вынужденных колебаний высших порядков в экранированных диэлектрических резонаторах путем использования щелевой линии // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 25–33.
11. Козут А. Е. Влияние условий и способов возбуждения полудискового диэлектрического резонатора на характеристики колебаний шепчущей галереи // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2007. – Т. 50, № 5. – С. 22–30.

#### REFERENCES

1. ILCHENKO, M. E., (ed.) VZYATYSHEV, V. F., GASSANOV, L. G. and BEZBORODOV, YU. M., 1989. *Dielectric resonators*. Moscow, USSR: Radio i Svyaz' Publ. (in Russian).
2. KIRICHENKO, A. YA., PROKOPENKO, YU. V., FILIPPOV, YU. F. and CHERPAK, N. T., 2008. *Quasi-optical solid-state resonators*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).

3. BAZHILOV, V. A., 2007. *Calculation and investigation of cylindrical shielded microwave and EHF vibrational systems based on dielectric resonators*. PhD thesis ed. Yu. E. Sedakov Research Institute of the measuring systems, (in Russian).
4. KOGUT, A. E., KUTUZOV, V. V. and KHARKOVSKY, S. N., 1998. Forced higher order oscillations of a hemispherical shield. In: *8th Int. Crimean Conf. on Microwave engineering and telecommunication technologies, CriMiCo, Proceedings*. Sevastopol, Ukraine. vol. 1, pp. 158–159, (in Russian).
5. EREMENKO, Z. E., FILIPOV, YU. F., KHARKOVSKY, S. N. and KOGUT, A. E., 2002. Whispering-gallery modes in shielded hemispherical dielectric resonators. *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* vol. 50, is. 11, pp. 2647–2649. DOI: 10.1109/TMTT.2002.804627
6. KHARKOVSKY, S. N., KOGUT, A. E. and SOLODOVNIK, V. A., 1995. Focusing of the Whispering-Gallery Waves in a Quasi-Optical Hemispherical Dielectric Resonator. *Pis'ma Zh. Tekh. Fiz.* vol. 21, no. 18, pp. 38–42, (in Russian).
7. IVANOV, E. N., KARACHEV, A. A. and TSARAPKIN, D. P., 1987. Enhancement of the excitation efficiency of dielectric disk resonators. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektronika*. vol. 30, no. 10, pp. 68–69, (in Russian).
8. NOSATIUK, S. O., 2016. *Excitation of the whispering gallery modes in screened quasioptical dielectric resonators by a planar waveguide*. PhD thesis ed. O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, NAS of Ukraine, (in Russian).
9. KHARKOVSKY, S. N., KOGUT, A. E. and KUTUZOV, V. V., 1997. Excitation of beam oscillations in quasioptical dielectric resonators with whispering gallery modes. *Pis'ma Zh. Tekh. Fiz.* vol. 23, no. 15, pp. 25–29, (in Russian).
10. KOGUT, A. E., NOSATIUK, S. O., SOLODOVNIK, V. A. and DOLIA, R. S., 2014. Implementation of higher order forced oscillations mode in shielded dielectric resonators by using slotline. *Radioelectron. Commun. Syst.* vol. 57, no. 10, pp. 451–456. DOI: 10.3103/S0735272714100033
11. KOGUT, A. E., 2007. The impact of conditions and techniques of excitation of a half-disk dielectric resonator on characteristics of “whispering gallery” oscillations. *Radioelectron. Commun. Syst.* vol. 50, is. 5, pp. 248–252. DOI: 10.3103/S0735272707050032

A. E. Kogut<sup>1</sup>, I. K. Kuz'michev<sup>1</sup>, E. A. Kogut<sup>2</sup>, R. S. Dolia<sup>1</sup>, S. O. Nosatiuk<sup>1</sup>, Ye. A. Shulha<sup>1</sup>, and He Jaochan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085 Ukraine

<sup>2</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>3</sup>Eastern-Chinese Institute “Photoelectronics”, Huajinnan Road, Huaxia Technological Park, Wuhu, 241002, Anhui Province, P. R. China

#### HIGH-Q SHIELDED DIELECTRIC DISK RESONATOR WITH WHISPERING GALLERY MODES

*Purpose:* Investigation of a shielded disk dielectric resonator (DR) having a high Q-factor and improved spectral characteristics.

*Design/methodology/approach:* The experimental study of energy characteristics of the investigated shielded resonator was carried out by using the PNA–L Network Analyzer N5230a 10 MHz ÷ 40 GHz Agilent Technologies. Spectral characteristics of the resonance system were analyzed using the panoramic voltage standing wave ratio meter R2-65. The modes excited in the shielded DR were identified by investigating the distribution of the electric component of the resonant field along the radial coordinate. For rapid and accurate numerical simulation of the investigated resonance system, the CST Microwave Studio 2013 software package was used.

*Findings:* The peculiarities of excitation of the lowest radial  $HE_{311}$  whispering gallery mode in the shielded disk DR with the help of a waveguide coupling element are considered. It is shown that in the region of the dielectric–air interface, the resonant field is characterized by the greatest intensity. The maximum excitation efficiency of the whispering gallery modes in the DR is achieved when the coupling element is located on the border of the dielectric disk. It is established that the field of the whispering gallery mode in an open disk DR is concentrated mainly in the material the resonator is made of. In a shielded DR, the resonant field shifts to the air gap region. In this case, the ohmic losses in the metal shield walls are small, since the intensity of the resonance field at the air–metal interface is insignificant. Due to this, the loaded Q-factor of the shielded DR increases by more than 1.9 times in comparison with the open DR. *Conclusions:* A shielded disk DR under certain excitation conditions has a high value of the loaded Q-factor and the rarefied oscillation spectrum. This makes it promising for the use in frequency stabilization schemes for millimeter wave solid-state sources.

*Key words:* shielded dielectric resonator, whispering gallery modes, Q-loaded, rarefied spectrum

O. E. Kogut<sup>1</sup>, I. K. Кузьмичев<sup>1</sup>, Е. О. Когут<sup>2</sup>, Р. С. Доля<sup>1</sup>, С. О. Носатюк<sup>1</sup>, Е. О. Шульга<sup>1</sup>, Хе Джаочан<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

<sup>3</sup>Східно-Китайський НДІ “Фотоелектроніка”, м. Уху, 241002, провінція Аньхой, КНР

#### ВИСОКОДОБРОТНИЙ ДИСКОВИЙ ЕКРАНОВАНИЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР З МОДАМИ ШЕПОЧУЧОЇ ГАЛЕРЕЇ

*Предмет і мета роботи:* Дослідження екранованого дискового діелектричного резонатора (ДР), що має високу добротність і покращені спектральні характеристики.

*Методи та методологія:* Експериментальні дослідження енергетичних характеристик даного екранованого резонатора виконано за допомогою вимірального комплексу PNA–L Network Analyzer N5230a 10 MHz ÷ 40 GHz Agilent Technologies. Спектральні характеристики резонансної системи аналізувалися на панорамному вимірнику коефіцієнта



стоячої хвилі за напругою Р-65. Моді, збуджувані в екранованому ДР, ідентифікувалися шляхом вивчення розподілу електричної компоненти резонансного поля уздовж радіальної координати. Для швидкого і точного чисельного моделювання даної резонансної системи використовувався пакет програм CST Microwave Studio 2013.

*Результати:* Розглянуто особливості збудження нижчої радіальної  $HE_{3111}$  моди шепочучої галереї (ШГ) в екранованому дисковому ДР за допомогою хвилеводного елемента зв'язку. Показано, що в області межі розділу середовищ діелектрик–повітря резонансне поле характеризується найвищою інтенсивністю. Максимальна ефективність збудження мод шепочучої галереї в ДР досягається при розташуванні елемента зв'язку на краю діелектричного диска. Встановлено, що поле моди ШГ у відкритому дисковому ДР зосереджено головним чином в матеріалі, з якого виготовлено резонатор. У екранованому ДР резонансне поле зміщується

в область повітряного проміжку. При цьому омічні втрати в стінках екрану невеликі, оскільки інтенсивність резонансного поля на межі розділу середовищ повітря–метал несуттєва. Завдяки цьому навантажена добротність екранованого ДР є понад 1.9 рази вищою навантаженої добротності відкритого ДР.

*Висновок:* Екранований дисковий ДР за певних умов збудження має високе значення навантаженої добротності і розріджений спектр коливань. Це робить його перспективним для використання у схемах стабілізації частоти твердотілих джерел міліметрового діапазону.

*Ключові слова:* екранований діелектричний резонатор, моди шепочучої галереї, навантажена добротність, розріджений спектр

*Стаття постуила в редакцію 17.10.2017*